

### МИКРОТРОН на 5 Мэв

Б. З. КАНТЕР, В. В. ЛЕРМОНТОВ, Д. А. НОСКОВ, Ю. Г. ЮШКОВ

Принцип действия микротрона был предложен в 1944 году советским ученым В. И. Векслером. Микротрон представляет собой циклический резонансный ускоритель с постоянным магнитным управляющим полем и постоянной частотой ускоряющего электрического поля. Электроны, получающие энергию от электрического поля при прохождении зазора резонатора, свободно движутся в постоянном магнитном поле по круговым орбитам и попадают снова в зазор резонатора. В этом ускорителе возрастание периода обращения электронов с увеличением их энергии равно или кратно периоду ускоряющего высокочастотного электрического поля резонатора.

Устойчивость движения электронов обеспечивается, как и в других резонансных ускорителях, действием принципа автофазировки. В отличие от линейных ускорителей и синхротронов величина фазостабильной области микротрона составляет  $20 \div 30^\circ$ .

Микротрон имеет ряд достоинств, выгодно выделяющих его перед другими ускорителями. Это, во-первых, простота конструкции ускорителя и необходимого оборудования, во-вторых, высокая моноэнергетичность спектра ускоренных электронов. Большое расстояние между биоритами значительно упрощает задачу вывода электронов из ускорительной камеры микротрона.

Основными узлами микротрона являются: электромагнит со схемой питания, вакуумная камера, резонатор с высокочастотным трактом, генератор сверхвысокой частоты и система управления. Блок-схема микротрона показана на рис. 1. В межполюсном пространстве помещается вакуумная камера (рис. 2), изготовленная из нержавеющей стали. Необходимый для нормального ускорения электронов вакуум создается в камере с помощью форвакуумного насоса РВН-20 и диффузионного насоса Н-5.

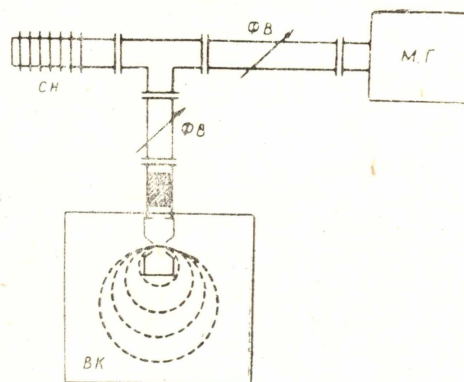


Рис. 1. Блок-схема микротрона  
м. г.—магнетронный генератор,  
ф. в.—фазовращатель, С. Н.—согласованная нагрузка, в. к.—вакуумная камера.

В качестве ускоряющего элемента в микротроне используется тороидальный резонатор, между полыми конусами которого развивается ускоряющее напряжение.

Для нормальной работы микротрона необходимо в зазоре резонатора получить напряжение около 600 кВ.

Резонатор, применяемый в микротроне, изготовлен из латуни (рис. 2). После серебрения и хромирования он имеет добротность  $Q=2000$ , при диаметре отверстия связи 2,2 см. При этом коэффициент отражения по мощности  $\kappa=19,5\%$  ( $KCB=2,6$ ). Возбуждение резонатора осуществляется через круглое отверстие связи от волноводного высокочастотного тракта, подключенного к магнетронному генератору (рис. 1).

Для обеспечения устойчивой работы магнетрона мощность, поступающая от генератора, делится между резонатором и согласован-

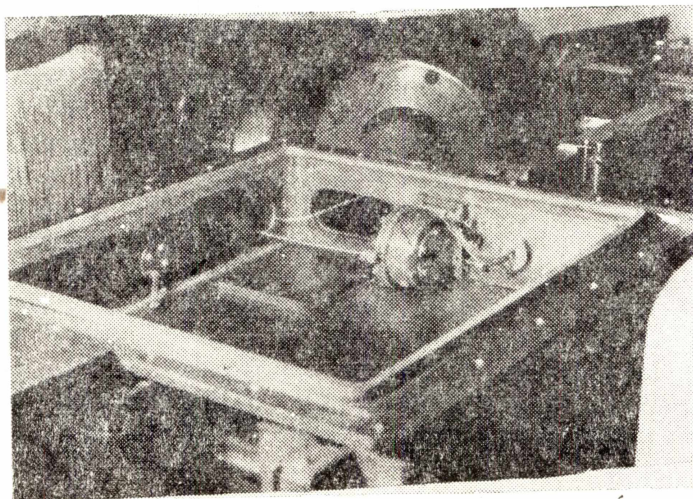


Рис. 2. Вакуумная камера микротрона со снятой верхней крышкой и резонатором.

ной нагрузкой (СН). С целью изменения электрической длины участка волновода между тройником и резонатором используется фазовращатель (ФВ).

Перед тройником в высокочастотном тракте также помещен фазовращатель, изменяющий электрическую длину участка тройник—магнетрон, что позволяет обеспечить более благоприятный режим работы для магнетрона.

Зазор между полюсами принят 12,5 см с учетом размеров резонатора, толщины стенок камеры и зазоров между стенами камеры и полюсами.

Диаметр полюсов определяется радиусом последней орбиты ( $r=17,43$  см) с учетом спада поля на краях полюсов и принят равным 55 см.

Сечение магнитопровода микротрона определяется величиной магнитного потока с учетом рассеяния и равно  $30 \times 12$  см<sup>2</sup>.

Коэффициент рассеяния и распределение поля в межполюсном пространстве проверены на модели электромагнита, выполненного в масштабе 1:2,5.

Основные детали микротрона были изготовлены к 1959 году, и сразу начались работы по наладке отдельных узлов и их испытание.



Измерение параметров резонатора и согласование В. Ч. тракта проводились в непрерывном режиме на малой мощности. После этого тракт испытывался на большой мощности в импульсном режиме.

Параллельно проводились работы по наладке вакуумной системы и устранению течи в вакуумной камере микротрона. Одновременно проводились измерения энергии электронов, ускоренных в зазоре резонатора. Для этого была изготовлена вспомогательная вакуумная камера и электростатический анализатор скоростей электронов. Измерения показали, что с существующей конструкцией резонатора и В. Ч. системы можно получить напряжение в ускоряющем зазоре  $250 \div 300$  кВ.

На основании измерений и анализа недостатков конструкции резонатора был разработан и изготовлен новый резонатор, позволяющий получить напряжения до 400 кВ.

С этим резонатором микротрон был запущен на энергию 2,5 МэВ. Был зарегистрирован ток на 9 орбитах, и наблюдалось свечение на экране, перемещающемся внутри камеры.

Для исследования возможности увеличения мощности, отдаваемой генератором резонатору, был проведен ряд опытов, одним из которых явилось исследование влияния диаметра отверстия связи резонатора с волноводом на величину высокочастотной мощности, проходящей в резонатор.

Диаметр отверстия связи менялся от 16 до 26 мм через 2 мм и в каждом случае измерялся КСВ около резонатора.

Проведенный опыт позволяет сделать следующие выводы.

1. С увеличением диаметра отверстия связи мощность, поступающая в резонатор, увеличивается.
2. С увеличением диаметра отверстия связи ухудшается добротность связанного резонатора.
3. С увеличением диаметра отверстия связи улучшается согласование резонатора с волноводом, т. е. увеличивается доля мощности, идущая к резонатору.

Суммарное действие этих факторов приводит к тому, что с увеличением диаметра отверстия связи напряжение в резонаторе вначале увеличивается, достигает максимума и затем уменьшается.

После этих опытов диаметр отверстия связи был увеличен до 2,2 см, и напряжение на зазоре резонатора удалось повысить до 650 кВ, что позволило запустить микротрон в основном режиме на энергию 5 МэВ. Прибором ЭППВ записан ток на 9 орбитах (рис. 3), орбиты наблюдались и визуально на экране через окно в ускоряющей камере.

В основном режиме, как и в „половинном“ (2,5 МэВ), наблюдается быстрый спад тока и на 9 орбите ток в импульсе составляет несколько мкА.

В процессе запуска на микротроне проводилась работа, направленная на увеличение тока путем применения холодных и накаливаемых катодов в резонаторе.

В большинстве микротронов ввод электронов в ускорение — инжекция — осуществляется за счет автоэлектронной эмиссии с поверхности электродов ускоряющего резонатора. Расчет показывает, что длительность импульсов тока инжекции составляет око-

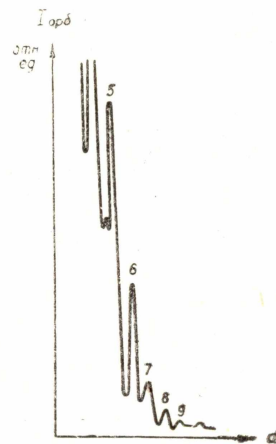


Рис. 3. Распределение тока на орбитах микротрона.

ло  $1/10$  периода высокочастотного напряжения, а по фазе эти импульсы совпадают с высокочастотным напряжением. Описанный метод инжекции обладает существенными недостатками: во-первых, эмиссионные свойства холодной поверхности электродов резонатора почти не поддаются регулировке и сильно изменяются со временем; во-вторых, из-за большой ширины энергетического спектра лишь относительно небольшая часть электронов входит на вторую и последующие орбиты, т. е. велика бесполезная электронная нагрузка резонатора.

Известно, что путем использования термоавтоэлектронной эмиссии с накаливаемого катода можно добиться расширения импульса тока инжекции, что должно привести к сужению энергетического спектра и сдвигу максимума его в сторону больших энергий.

Результаты измерений показывают, что энергетический спектр в случае инжекции с холодного катода отличается тупым максимумом, соответствующим энергии около 70 % от наибольшей, и пологим спадом в сторону верхнего края спектра (рис. 4).

Характерным отличием энергетического спектра ускоренных электронов при инжекции с накаливаемого катода является острый максимум вблизи верхней границы спектра. Этот максимум приходится на энергию около 90 % от наибольшей и переходит к резкому спаду

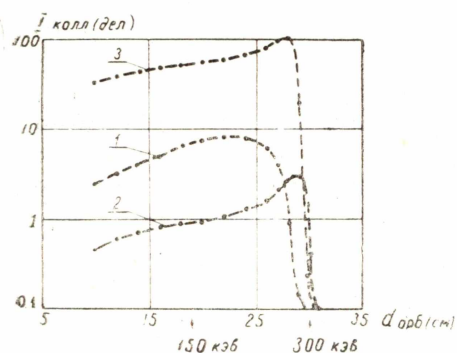


Рис. 4. Энергетические спектры электронов: 1—с холодного катода, 2—температура катода  $2500^{\circ}\text{K}$ , 3—температура катода  $3000^{\circ}\text{K}$ .

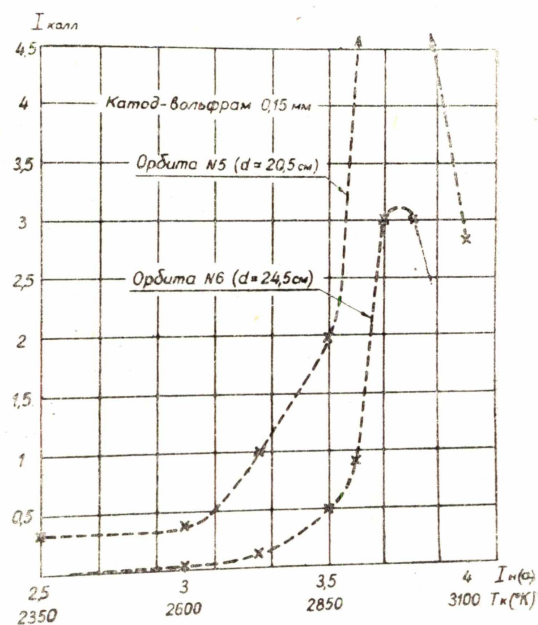


Рис. 5. Изменение тока на орбитах с увеличением температуры катода: 1—ток на шестой орбите, 2—ток на пятой орбите.

в сторону верхнего края спектра. Характерная форма его сохраняется в большом диапазоне температур  $2500 \div 3000^{\circ}\text{K}$ . Сравнение кривых 1 и 2 на рис. 4 показывает, что электронный ток, который может выйти на вторую и последующие орбиты при инжекции с накаливаемого катода, в несколько раз больше, чем при инжекции с холодного катода при неизменной электронной нагрузке.

Работа накаливаемого катода была проверена в режиме ускорения до  $2,5 \text{ МэВ}$ .

Зависимость тока на пятой и шестой орбитах от температуры катода показана на рис. 5. Из графика видно, что применение накаливаемого катода первой конструкции позволило регулировать ток ускоренных электронов в широких пределах. Даже при несогласованном



резонаторе были получены средние токи на шестой орбите около  $2 \cdot 10^{-9}$  а.

Так как мощность, вводимая в резонатор во время эксперимента, была небольшой, то увеличение электронной нагрузки приводило к уменьшению напряжения на резонаторе и нарушению режима ускорения, что видно по максимуму на графиках.

Из камеры данного микротрона предполагается вывести пучок ускоренных электронов. Так как расстояние между двумя соседними электронными орбитами в микротроне составляет около 3 см, то вывод пучка электронов можно осуществить с помощью магнитного шунта.

Для вывода пучка с различных орбит разработано устройство, позволяющее вводить железную трубу, выполняющую роль шунта, в камеру и поворачивать ее по азимуту в необходимых пределах.

В настоящее время проводятся работы по выяснению причин спада тока на орбитах и увеличению тока ускоряемых электронов.